

文章编号: 1000-5013(2011)03-0241-06

轴棱锥产生局域空心光束的几种新技术

张前安, 吴逢铁, 马亮

(华侨大学 信息科学与工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要: 介绍几种基于传统轴棱锥和新型轴棱锥产生局域空心光束的新方法,并基于几何光学、波动光学和矩阵光学理论进行分析和模拟.研究表明:4种方法都可以获得高质量且尺寸可调的局域空心光束,也都利用了轴棱锥高转换效率、高损伤阈值的优点,但在元件集成及加工制造上各有优缺点.

关键词: 轴棱锥;局域空心光束;传输特性;产生方法

中图分类号: O 436

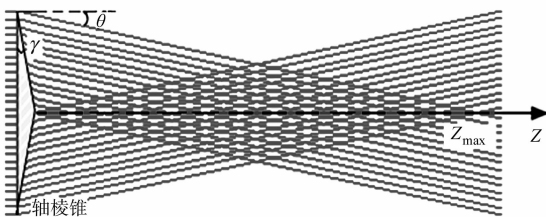
文献标志码: A

作为一种可以俘获、诱导粒子的优良三维光学势阱,光学 Bottle 概念很早就被提出^[1].此后,局域空心光束(bottle beam)被描述为一束沿光传播方向上有着强度极低(甚至为零)的三维封闭区域的光束^[2],具有极高的强度梯度.局域空心光束可作为激光导管^[3]、光镊^[4]和光学扳手^[5-6]等的工具,还可以用于激光囚禁微观粒子和中性原子、分子等^[7],在生命科学和纳米科技中有重要应用.目前,产生局域空心光束的方法有多种,如文献[8]通过抽运光束和限制孔径的端面抽运固体激光器产生局域空心光束,Zhao 等^[9]提出了一种利用衍射光学元件来产生光链的方法.随着光束整形技术的发展,Arlt 等^[2]利用高斯光束和拉盖尔高斯光束干涉产生局域空心光束,Monk 等^[10-11]发现利用轴棱锥透镜系统产生 Bessel 光并聚焦也可以形成局域空心光束,文献[12-16]对此作了详细的理论和实验研究.本文介绍了几种基于传统轴棱锥和新型轴棱锥产生局域空心光束的新技术,并对其进行讨论和比较.

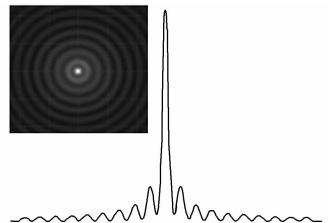
1 传统轴棱锥产生近似无衍射 Bessel 光

当一束平行光入射到轴棱锥上后,将被转换为具有相同偏转角(入射光与出射光的夹角)的锥面光波,锥面波相干叠加就形成了近似无衍射 Bessel 光.通过光学设计软件 ZEMAX 对该过程的模拟,轴棱锥后的菱形交叠区就是形成的近似无衍射区,如图 1 所示.由几何关系可得最大无衍射距离为^[17]

$$Z_{\max} \approx d / [(n - 1) \gamma]. \quad (1)$$



(a) 平面波通过锥透镜产生 Bessel 光束



(b) 无衍射光光斑及径向光强分布

图 1 传统轴棱锥产生近似无衍射 Bessel 光的模拟

Fig. 1 Simulation of the diffraction-free Bessel beam generated by traditional axicon

式(1)中: d 为入射轴棱锥的光束半径; n 为轴棱锥的折射率; γ 轴棱锥的底角.

收稿日期: 2010-04-23

通信作者: 吴逢铁(1958-),男,教授,主要从事光束传输与控制、超短光脉冲及其非线性效应的研究. E-mail:ftwu@public.qz.fj.cn.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60977068);福建省泉州市科技计划重点项目(2009G4)

2 基于传统轴棱锥和新型轴棱锥产生局域空心光束

2.1 Bessel 光相干产生局域空心光束

文献[18]研究了贝塞尔光的干涉问题,分析环缝-透镜产生的两束贝塞尔光的干涉情况,但其环缝-透镜法效率很低(仅为 15%),且不涉及局域空心光束.文献[19]提出一种基于两个不同锥角的轴棱锥产生两束贝塞尔光,然后干涉叠加产生局域空心光束的新技术,其装置如图 2 所示.理想的 Bessel 光可以描述为^[20]

$$E(\rho, k_r, k_z, z, t) = \exp[i(k_z z - \omega t)] J_0(k_r \rho). \quad (2)$$

式(2): k_r 和 k_z 分别为波矢的径向和纵向分量, $k_r^2 + k_z^2 = k^2 = (\omega/c)^2$; k 为波数; c 为光速; ω 为光波的圆频率; ρ, z 分别为柱坐标中的径向距离及轴向距离, $\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$; J_0 为第一类零阶 Bessel 函数.

两束同频率而具有不同纵向波矢分量的 Bessel 光进行干涉叠加的合场强可为

$$I = J_0^2(k_{r_1} \rho) + J_0^2(k_{r_2} \rho) + 2J_0(k_{r_1} \rho) J_0(k_{r_2} \rho) \cos[(k_{z_1} - k_{z_2})z + (\Phi_1 - \Phi_2)]. \quad (3)$$

式(3): Φ_1, Φ_2 是常量,表示两束 Bessel 光的初相位.选取参量: $\Phi_1 - \Phi_2 = 0, f_1 = 15 \text{ mm}, f_2 = 6 \text{ mm}, d = 100 \text{ mm}, \gamma_1 = 0.5^\circ, \gamma_2 = 1^\circ, k_{r_1} = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma_1, k_{r_2} = \frac{2\pi}{\lambda}(n-1)\gamma_2, \lambda = 632.8 \text{ nm}, k_{z_1} = \sqrt{k_1^2 - k_{r_1}^2}, k_{z_2} =$

$\sqrt{k_2^2 - k_{r_2}^2}, n = 1.458$,波数 $k_1 = k_2 = 2\pi/\lambda$.通过数值模拟,该相干叠加的合场强如图 3 所示.由图 3 可以看出,Bessel 光叠加后的光场存在局域空心光束,而且局域空心光束还具有有趣的自成像 Talbot 效应.其具有自成像 Talbot 效应的原因在于,相干叠加后的合场强随式(3)中的第 3 项振荡,其振荡周期(或称 Talbot 距离)为

$$z_T = |2\pi/(k_{z_1} - k_{z_2})|. \quad (4)$$

像重建的空间周期取决于 z_T .由 $k_z = \sqrt{k^2 - k_r^2}$ 可知,通过改变径向波矢分量 k_r 可以达到控制像重建的空间周期,而 k_r 与轴棱锥底角 γ 的关系为 $k_r = k(n-1)\gamma$.因此,通过改变轴棱锥底角即可控制像重建的空间周期及局域空心光束的尺寸.

Bessel 光相干叠加产生的局域空心光束具有自成像 Talbot 效应,且像重建的空间周期及局域空心光束的尺寸可以调节.这一点对于微粒操控具有特殊意义,可实现微粒的多层面操控^[21].利用 Bessel 光相干产生局域空心光束的理论在实验上得到了证实,理论和实验结果基本吻合,光转换效率也很高(大于 90%)^[22].

2.2 梯度轴棱锥产生单个局域空心光束^[23]

图 4 为梯度轴棱锥形成局域空心光束的示意图.从图 4 可知,产生单个局域空心光束的梯度轴棱锥与传统的轴棱锥的不同之处在于其顶部底角 γ_2 大于底部底角 γ_1 .因此,平面波经过梯度轴棱锥后,将分别被锥底部分的锥面和锥顶部分的锥面变换为两束不同的近似无衍射光,分别如图 4 中虚线围成的菱形区域和实线围成的菱形区域所示.在这两菱形区域之间出现了一个没有光的空心区域,即局域空心光束(图 4 中被加粗黑体线包围的阴影区域).

由式(1)可知,利用最大无衍射距离的估算可判断这两束近似无衍射光的位置,从而确定局域空心

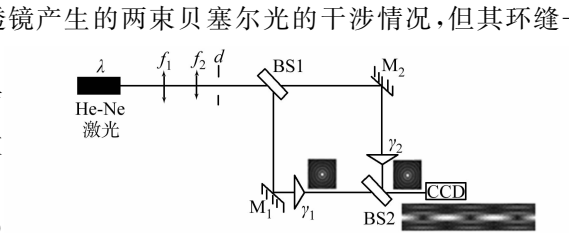


图 2 Bessel 光相干产生局域空心光束实验装置图
Fig. 2 Experimental schematic diagram of the optical bottle beam generated by interfering Bessel beams

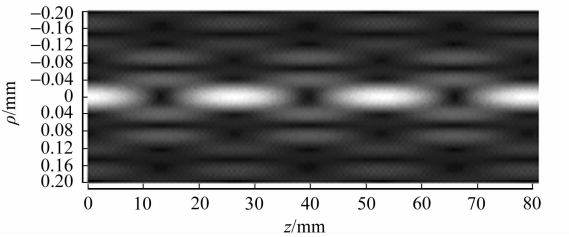


图 3 两束 Bessel 光相干产生局域空心光束的光强分布
Fig. 3 Optical intensity distribution of the bottle beam generated by two interfering Bessel beams

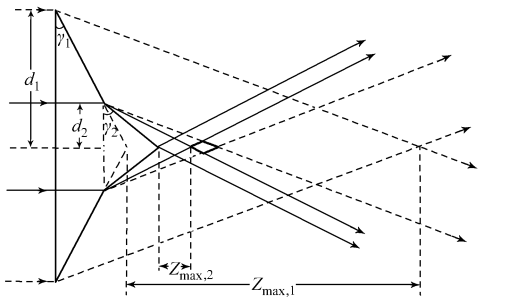


图 4 梯度轴棱锥形成局域空心光束示意图
Fig. 4 Scheme of bottle beam generated by gradient axicon

光束的位置. 利用广义菲涅尔衍射积分理论, 可以严格计算平面波经过梯度轴棱锥的衍射光场. 对于梯度轴棱锥而言, 底端部分形成的无衍射光可以表示为

$$E_1(r_1 - z) \propto \frac{1}{\lambda z} \int_0^{d_1} \rho \exp \left\{ i k \rho \left[\frac{\rho}{2z} - (n-1) \gamma_1 \right] \right\} \times J_0 \left(\frac{k r_1 \rho}{z} \right) d\rho; \tag{5}$$

而顶端部分形成的无衍射光可以表示为

$$E_2(r_2 - z) \propto \frac{1}{\lambda z} \int_0^{d_2} \rho \exp \left\{ i k \rho \left[\frac{\rho}{2z} - (n-1) \gamma_2 \right] \right\} \times J_0 \left(\frac{k r_2 \rho}{z} \right) d\rho. \tag{6}$$

式(5),(6)中: $k=2\pi/\lambda$ 是波矢; λ 为入射光波长; γ_1 和 γ_2 分别为梯度轴棱锥底部和顶部的底角; d_1 和 d_2 分别为梯度轴棱锥底部和顶部的入射光束半径. 梯度轴棱锥的整个光场分布可以认为是顶端部分形成的无衍射光束和底端部分形成的无衍射光束相干叠加的结果, 因此其光强分布可以表示为

$$I(r, z) = | E_1(r_1, z) + E_2(r_2, z) |^2. \tag{7}$$

利用式(5),(6)和(7)模拟纵向剖面光强分布, 结果如图 5 所示. 图 5 中的模拟参数: $d_1=5\text{ mm}$, $d_2=2.5\text{ mm}$, $\gamma_1=0.5^\circ$, $\gamma_2=0.55^\circ$, $\lambda=632.8\text{ nm}$, $n=1.5$.

由图 5 可知, 梯度轴棱锥形成两片无衍射区域, 并在中间形成一个局域空心光束. 利用梯度轴棱锥产生局域空心光束的技术, 采用单一元件即可实现, 具有装置简单、容易控制、转换效率高等优点, 利于设备集成化. 但是, 目前加工高精度的梯度轴棱锥是比较困难的.

2.3 阶变折射率轴棱锥产生局域空心光束

上述梯度轴棱锥加工的主要困难在于其顶部底角 γ_2 要大于底部底角 γ_1 , 而 $\gamma_2 > \gamma_1$ 的目的是让中间部分比边缘部分对入射光有更大的偏折能力. 由传统轴棱锥偏转角式可知, 偏转角由折射率 n 和底角 γ 共同决定.

因此, 在 $\gamma_2 = \gamma_1$ 且 $n_1 > n_2$ 时也能达到相同效果. 据此, 提出了阶变折射率轴棱锥产生局域空心光束的理论^[24]. 阶变折射率轴棱锥形成局域空心光束, 如图 6 所示. 图 6(a)的模拟参数: $\lambda=632.8\text{ nm}$, $d_2=1.9\text{ mm}$, $d_1=5\text{ mm}$, $\gamma_1=0.5^\circ$, $n_1=1.5$, $n_2=1.8$; 图 6(b)的模拟参数: $\lambda=632.8\text{ nm}$, $d_2=1.5\text{ mm}$, $d_1=5\text{ mm}$, $\gamma_1=0.5^\circ$, $n_1=1.55$, $n_2=1.5$.

阶变折射率轴棱锥中心部分与边缘部分分别由两种折射率不同的介质构成, 即 $n_1 \neq n_2$. 因此, 一束平面光波经过阶变折射率轴棱锥后, 将分别被折射率为 n_1 和 n_2 的部分折射, 成为两束不同的近似无衍射光, 分别如图 6 中实线和虚线围成的菱形区域所示.

从图 6(a)可知, 当 $n_1 < n_2$ 时, 虚线菱形区域与实线菱形区域发生重叠(黑体线包围的阴影区). 重叠的区域两束无衍射光干涉叠加的区域, 将产生具有自成像 Talbot 效应的局域空心光束. 从图 6(b)可知, 当 $n_1 > n_2$ 时, 虚线菱形区域与实线菱形区域发生分离, 它们之间出现一个没有光通过的暗区, 即局

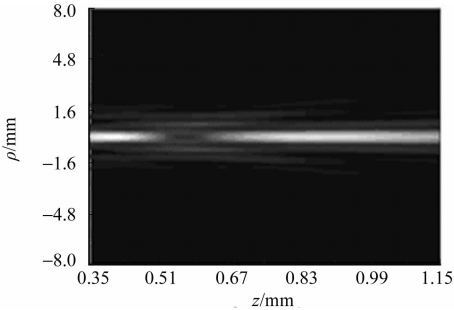


图 5 梯度轴棱锥产生局域空心光束的纵向光强剖面模拟
Fig. 5 Simulation on the optical intensity distribution of the bottle beam generated by gradient axicon

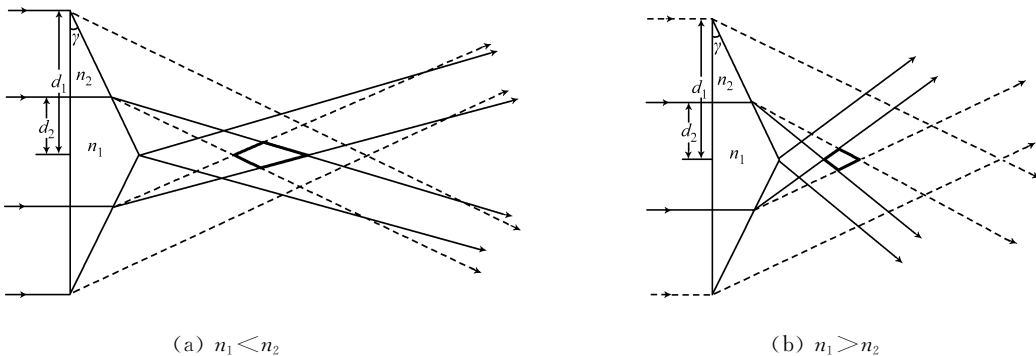


图 6 阶变折射率轴棱锥形成局域空心光束
Fig. 6 Scheme of bottle beam generated by step refractive index axicon

域空心光束(黑体线包围的阴影区). 这与梯度轴棱锥产生单个局域空心光束的原理类似.

平面波经过阶变折射率轴棱锥后,其光场分布表达式与式(5)~(7)类似,因此只需将式(5)的 $(n-1)\gamma_1$ 替换为 $(n_1-1)\gamma$,式(6)的 $(n-1)\gamma_2$ 替换为 $(n_2-1)\gamma$ 即可. 利用替换后光强分布表达式可模拟出相应的光强分布图. 平面波经过阶变折射率轴棱锥后的纵向光强分布,如图 7 所示. 图 7 中的模拟参数与图 6 相同.

由图 7 可以看出,当 $n_1 < n_2$ 和 $n_1 > n_2$ 时,折射率阶变轴棱锥可分别产生多个具有自成像 Talbot 效应的局域空心光束和单个局域空心光束. 阶变折射率透镜 (GRIN LENS) 在光纤光学中已得到广泛应用^[25-27], 因此相对于梯度轴棱锥,阶变折射率轴棱锥在加工上会容易得多.

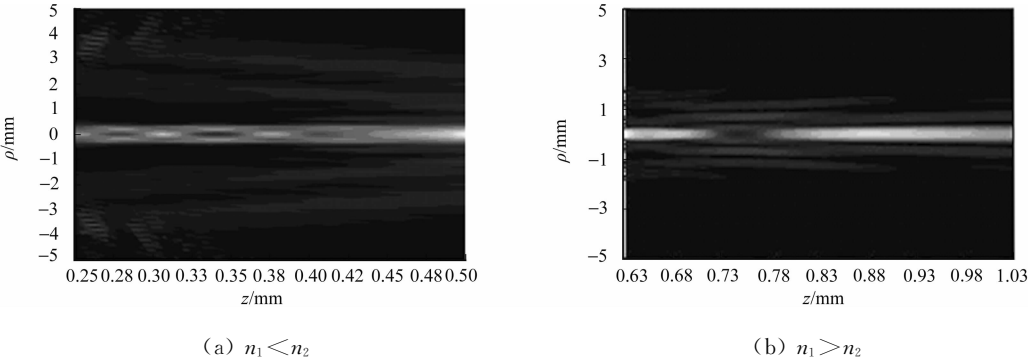


图 7 阶变折射率轴棱锥产生局域空心光束的纵向光强剖面模拟
Fig. 7 Simulation on the optical intensity distribution of the bottle beam generated by step refractive index axicon

2.4 组合轴棱锥产生局域空心光束

组合轴棱锥由两个同种介质制成的底面半径不同的传统轴棱锥 I 和 II 同轴相对紧密胶合而成. 组合轴棱锥产生局域空心光束,如图 8 所示. 由传统轴棱锥偏转角式可知,当折射率 n 一定时,偏转角与底角成正比关系,底角越大,偏转角越大. 因此,当 $r < d_2$ 时,平行光入射组合轴棱锥相当于经过一个底角为 $(\gamma_1 + \gamma_2)$ 的轴棱锥,其相应的偏转角为

$$\theta_{r < d_2} = (n-1)(\gamma_1 + \gamma_2); \tag{8}$$

而当 $d_2 < r < d_1$ 时,入射的平行光只经过轴棱锥 II,相应的偏转角为

$$\theta_{d_2 < r < d_1} = (n-1)\gamma_2. \tag{9}$$

因此它们各自出射光线的交叠区域仍为无衍射光,只不过两部分出射光线的偏转角不同,而使两个无衍射区域发生分离. 从图 8 可看出,它们之间出现一个没有光通过的暗区,即局域空心光束(黑体线包围的阴影区). 选择 I 和 II 轴棱锥不同的底角和底面半径,可以方便地控制局域空心光束的尺寸.

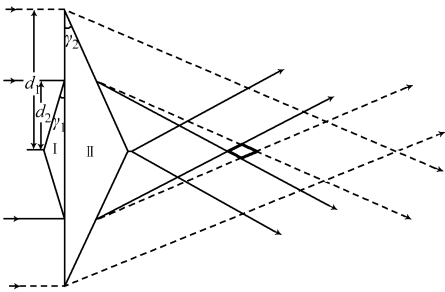


图 8 组合轴棱锥产生局域空心光束
Fig. 8 Scheme of bottle beam generated by combined axicon

进一步分析,还可以导出组合轴棱锥的 ABCD 矩阵和振幅透过率. 单个轴棱锥的 ABCD 矩阵和振幅透过率函数分别为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma/r & 1 \end{bmatrix},$$

$$T(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma r].$$

其中: n 为其折射率; γ 为底角; r 为其径向坐标. 因此,当 $r < d_2$ 时,组合轴棱锥的 ABCD 矩阵和振幅透过率函数分别表示为

$$M = M_{II} \cdot M_I =$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma_2/r & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma_1/r & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)(\gamma_2 + \gamma_1)/r & 1 \end{bmatrix}, \tag{10}$$

$$T(r) = T_{\text{I}}(r) \cdot T_{\text{II}}(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma_1 r] \cdot \exp[-ik(n-1)\gamma_2 r] = \exp[-ik(n-1)(\gamma_1 + \gamma_2)r];$$

(11)

而当 $d_2 < r < d_1$ 时,组合轴棱锥的 $ABCD$ 矩阵和振幅透过率函数分别表示为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -(n-1)\gamma_2/r & 1 \end{bmatrix},$$

(12)

$$T(r) = T_{\text{II}}(r) = \exp[-ik(n-1)\gamma_2 r].$$

(13)

利用式(10),(12)和 Collins 式可知,平面波经过组合轴棱锥后的光场分布表达式仍与式(5)~(7)类似,只需将式(5)的 $(n-1)\gamma_1$ 替换为 $(n-1)(\gamma_1 + \gamma_2)$ 即可. 利用替换后光强分布表达式可模拟出平面波通过组合轴棱锥后的纵向光强分布,如图 9 所示. 图 9 的模拟参数: $\lambda = 632.8 \text{ nm}$, $n = 1.5$, $a = 3 \text{ mm}$, $b = 5 \text{ mm}$, $\gamma_1 = 1^\circ$, $\gamma_2 = 0.5^\circ$.

由模拟图 9 可以看出,平面波通过组合轴棱锥后随着传输距离的增加,衍射光强分布由无衍射光变成局域空心光,然后又出现无衍射光的过程. 这与几何光学分析结果一致. 相对于梯度轴棱锥和阶变折射率轴棱锥,组合轴棱锥的加工更容易,只需将两个特定的传统轴棱锥同轴相对紧密胶合即可,也可以产生单个尺寸可调的局域空心光束.

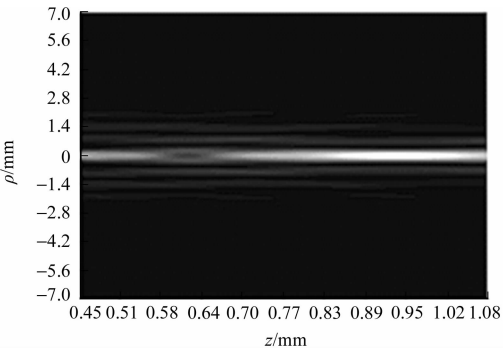


图 9 组合轴棱锥产生局域空心光束的纵向光强剖面模拟

Fig. 9 Simulation on the optical intensity distribution of the bottle beam generated by combined axicon

3 讨论

用传统轴棱锥和新型轴棱锥产生局域空心光束,可以充分利用其装置简单、转换效率高和损伤阈值高的优点. 通过比较可以发现,4 种方法的理论基础是一致的,都可以归结为 Bessel 光相干叠加产生局域空心光束,只不过采取的方式不尽相同.

第 1 种方法直接由两个传统轴棱锥产生两束 Bessel 光进行干涉叠加,而另外 3 种方法都采用单一元件——新型轴棱锥,将产生两束 Bessel 光进行相干叠加. 单一元件具有易于操作、抗干扰能力强、便于设备集成化的优点.

在这 3 种单一元件中,梯度轴棱锥存在加工困难的缺点,因此在其基础上提出了两种改进设计,即阶变折射率轴棱锥和组合轴棱锥. 阶变折射率轴棱锥在选择不同的折射率阶变顺序时可分别产生单个局域空心光束或多个周期性的局域空心光束,这在单层面或多层面微粒操控上有特殊应用价值. 组合轴棱锥由两个传统轴棱锥共轴紧密胶合而成,加工上更容易. 因此,后两种技术值得进一步的深入研究.

参考文献:

[1] ASHKIN A. Acceleration and trapping of particles by radiation pressure[J]. Phys Rev Lett,1970,24(4):156-159.

[2] ARLT J,PADGETT M J. Generation of a beam with a dark focus surrounded by regions of higher intensity: The optical bottle beam[J]. Opt Lett,2000,25(4):191-193.

[3] TATARKOVA S A,SIBBETT W,DHOLAKIA K. Brownian particle in an optical potential of the washboard type [J]. Phys Rev Lett,2003,91(3):1-4.

[4] GARCES-CHAVEZ V,MCGLOIN D,MELVILLE H,et al. Simultaneous micromanipulation in multiple planes using a self-reconstructing light beam[J]. Nature,2002,419(6903):145-147.

[5] PATERSON L,MACDONALD M P,ARLT J,et al. Controlled rotation of optically trapped microscopic particle [J]. Science,2001,292(5518):912-914.

[6] MACDONALD M P,PATERSON L,VOLKE-SEPULVEDA K,et al. Creation and manipulation of three-dimensional optically trapped structures[J]. Science,2002,296(5570):1101-1103.

[7] GRIER D G. A revolution in optical manipulation[J]. Nature,2003,424(6950):810-816.

[8] TAI T, HSIEH W F, CHEN C H. Direct generation of optical bottle beams from a tightly focused end-pumped solid-state laser[J]. Opt Express,2004,12(24):5827-5833.

- [9] ZHAO Yi-qiong, ZHAN Qi-wen, LI Yong-ping. Design of DOE for the control of optical “bubble” generated by highly focused radially polarized beams[C]//Proc of SPIE. Denver:[s. n.], 2004:616-625.
- [10] MONK S, ARLT J, ROBERTON D A, et al. The generation of Bessel beams at millimetre-wave frequencies by use of an axicon[J]. Opt Commun, 1999, 170(4/5/6):213-215.
- [11] ARLT J, DHOLAKIA K. Generation of high-order Bessel beams by use of an axicon[J]. Opt Commun, 2000, 177(1/2/3/4/5/6):297-301.
- [12] ZENG Xia-hui, WU Feng-tie. The analytical description and experiments of the optical bottle generated by an axicon and a lens[J]. Journal of Modern Optics, 2008, 55(18):3071-3081.
- [13] 卢文和, 吴逢铁, 马宝田. 环形障碍物-轴棱锥产生局域空心光束[J]. 物理学报, 2010, 59(9):6101-6105.
- [14] 卢文和, 吴逢铁. 轴棱锥透镜系统产生局域空心光束的几何光学解释[J]. 中国激光, 2009, 36(11):2924-2927.
- [15] 曾夏辉, 吴逢铁, 刘岚. 干涉理论对 Bottle Beam 的描述[J]. 物理学报, 2007, 56(2):791-797.
- [16] 刘岚, 吴逢铁. 衍射理论对局域空心光束及无衍射光束重建的描述[J]. 光学学报, 2008, 28(2):370-374.
- [17] MCGLOIN D, DHOLAKIA K. Bessel beams: Diffraction in a new light[J]. Contemporary Physics, 2005, 46(1):15-28.
- [18] PIESTUN R, SHAMIR J. Generalized propagation-invariant wave field[J]. J Opt Soc Am (A), 1998, 15(12):3039-3044.
- [19] 吴逢铁, 曾夏辉. 相干贝塞尔光产生具有塔尔博特效应的局域空心光束[J]. 光学学报, 2008, 28(1):174-178.
- [20] 邢笑雪, 吴逢铁, 张建荣. 无衍射 J_0 光束的理论分析[J]. 华侨大学学报:自然科学版, 2006, 27(1):31-34.
- [21] 刘彬, 吴逢铁, 江新光. 利用无衍射贝塞尔光束多层面操控微粒[J]. 中国激光, 2009, 36(2):379-382.
- [22] 吴逢铁, 刘彬, 卢文和, 等. 贝塞尔光束相干产生局域空心光束的实验研究[J]. 中国激光, 2009, 36(11):1-3.
- [23] 吴逢铁, 江新光, 刘彬, 等. 梯度轴棱锥产生单个 Bottle Beam[J]. 物理学报, 2009, 58(4):2410-2414.
- [24] 马亮, 吴逢铁. 阶变折射率轴棱锥产生局域空心光束[J]. 物理学报, 2010, 59(9):6096-6100.
- [25] TOMLINSON W J. Applications of grin-rod lenses in optical fiber communication-systems[J]. Applied Optics, 1980, 19(7):1127-1138.
- [26] PALAIS J C. Fiber couplind usind grade-index rod lenses[J]. Applied Optics, 1980, 19(12):2011-2018.
- [27] XIE Tu-qiang, GUO Shu-guang, CHEN Zhong-ping, et al. GRIN lens rod based probe for endoscopic spectral domain optical coherence tomography with fast dynamic focus tracking[J]. Optics Express, 2006, 14(8):3238-3246.

New Techniques for Generating Bottle Beam in Recent Years

ZHANG Qian-an, WU Feng-tie, MA Liang

(College of Information Science and Engineering, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: Several new techniques that based on traditional axicon and new axicon for generating bottle beam are introduced. By using geometrical optics, wave optics and matrix optics theory to analyze and simulate, we found that the four methods are all available for generating high quality and size adjustable bottle beam. And the advantages of axicon, such as high conversion efficiency and high damage threshold were all token of by these methods. Each method shows its advantages and disadvantages in element integration and manufacturing technique.

Keywords: axicon; bottle beam; transmission characteristics; generated method

(责任编辑: 黄晓楠 英文审校: 吴逢铁)